

Farklı Sıcaklık Koşullarına göre bir PV Panelin Kesirli Derece Ekstreum Arama Kontrolcüsü Kullanılarak MPPT Takibi

MPPT Tracking of a PV Panel Under Variable Temperature Conditions using a Fractional Order Extremum Seeking Controller

Mehmet Korkmaz¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Aksaray Üniversitesi, Aksaray
{mehmetkorkmaz}@aksaray.edu.tr

Özetçe

PV panellerin ürettiği güç ortam ve/veya giriş koşullarına göre değişmektedir. Tüketici tarafında ise panellerden alınan gücün maksimum olması talep edilir. Bu doğrultuda kontrolcüler kullanılarak giriş değerlerine göre ayarlamalar yapılarak maksimum gücün elde edilmesi sağlanır. Literatürde maksimum güç noktası takibi (MPPT) için farklı kontrolcüler önerilmektedir. Ekstreum arama kontrolcüsü (ESC) bunlardan biridir. Bu kontrolcü sayesinde PV panel modelinde belirsiz parametrelerin ve/veya ışınma, ortam sıcaklığı, panel kirliliği gibi çevresel etkenlerden kaynaklı çıkış gücünün değişimine adaptif olarak cevap verilebilir, maksimum güç nokta takibi yapılabilir. Bunlara ek olarak geliştirilmiş ESC yapıları da önerilmektedir. Bunlardan birisi kesirli matematiği temel alan yapıdır. Kesirli dereceden ekstreum arama kontrolcülerini (FO-ESC) sayesinde modelleme aralığı daha esnek ifade edilebilir, tam sayılı ESC'ye göre daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Bu çalışmada kontrolcü olarak FO-ESC yapısı kullanılarak çevresel etkenlerden olan sıcaklığın PV panellerin maksimum güç noktası takibi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Sonuçlara göre FO-ESC yapısının başarısını farklı senaryolar için değerlendirilmiştir.

Abstract

The power generated by PV panels varies according to the environment and/or input conditions. Consumers, on the other hand, demand maximum power from the panels. For this purpose, controllers are used to achieve the maximum power target even under varying conditions. Different controllers have been proposed in the literature for maximum power point tracking (MPPT). One of those is the extremum seeking controller which adaptively responds to the variation of the output power due to uncertain parameters in the PV panel model and/or environmental factors such as radiation, ambient temperature, panel pollution, etc. In addition, improved ESC schemes have also been proposed such as FO-ESC (Fractional order extremum search controllers) whose terms allow more flexible expression of the modeling. In this study, the FO-ESC model is used as a controller to investigate the maximum power point tracking of PV panels for varying temperatures. According to the results, the performance of the FO-ESC model is evaluated for different scenarios.

1. Giriş

Güneş enerjisi çevre dostu, düşük karbon ayak izi, bağımsız enerji üretimi gibi avantajları sayesinde birçok ülke ve bağımsız tüketiciler tarafından elektrik enerji üretimi için tercih edilmektedir. Bu sayede fosil yakıt kullanımı azaltılır, zor coğrafyalara bile yüksek maliyetli şebeke kurulumlarına gerek kalmaksızın enerji ulaştırılabilir [1-2].

Güneş ışığından gelen enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için fotovoltaik paneller (PV) kullanılırlar. Ancak PV paneller kullanılırken dikkat edilmesi gereken önemli hususlar bulunmaktadır. Panellerin çıkış gücü bunlardan birisi olup bu güç değeri ortam sıcaklığı, panel kirliliği, ışınım gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu değişkenlerin dikkate alınmadan panellerin kullanılması yeterince güneş ışığı olsa bile verimsiz çalışma koşullarının oluşmasına sebep olur. Bu durum literatürde maksimum güç noktası izleme (MPPT) problemi olarak ele alınmaktadır [3-4].

Bu probleme çözüm olarak literatürde farklı çözümler önerilmiştir. Örneğin PV panellerin farklı parametrelere göre daha iyi modelini temel alan modelleme tabanlı yaklaşımlar ve/veya parametrelerin elde edilmesindeki farklı teknikler bunlardan bazılarıdır. [5] çalışmasında bu durum göz önüne alınarak geliştirilmiş parametre çıkarım yöntemi kullanılmış ve kullanılan yöntemin doğruluğu artırıldığına dair sonuçlar sunulmuştur. [6] çalışmasında ise üretici bilgilerini kullanarak genelleştirilmiş bir matematiksel model sunulmuştur. Modelin etkinliği farklı altı ticari ürün üzerinden gösterilmiştir. [7]'de ise tek diyot modeli ile analitik modeli birleştiren bir yaklaşım önerilmiş, farklı çalışma şartları için yapılan denemelerle önerilen metodun etkinliği gösterilmiştir.

Bununla birlikte bir diğer çözüm ise kontrolcü kullanılarak değişken ortam koşullarına karşın güç noktası takibinin yapılmasıdır. Literatürde bu amaçla geliştirilmiş birçok kontrolcü yapısı bulunmaktadır. Örneğin [8] çalışmasında geliştirilmiş bir ESC yapısı önerilmiştir. Bu sayede optimum nokta takibi için daha hızlı ve gürbüz bir sonuç elde edildiğinden bahsetmiştir. [9] ise kesirli ESC yapısını kullanarak maksimum güç nokta takibi yapmıştır. Sistem dinamikleri ve bozucu etkilere karşı etkin sonuçlar üretildiğinden bahsedilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. PV Model ve çalışma düzeneği

Küresel ısınma, iklim değişikliği gibi problemlerin altında yatan önemli sebeplerden birisi fosil yakıt ve türevlerinin enerji kaynağı olarak kullanılmasıdır. Dünya genelinde bu tür problemlere karşı başat mücadele yöntemlerinden birisi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımınıdır. Bu kaynaklar içerisinde güneş enerjisi önemli bir rol almaktadır. Güneş enerjisi fotovoltaik panellerin (PV) güneş ışığını elektrığe dönüştürmesi ile elde edilir. Işınım, PV model yapısı, çevresel etki gibi birçok faktör elde edilen elektrik enerjisine etki etmektedir [1, 2, 8].

Çalışmalarda endüstriyel ve araştırma amaçlı kullanılan birçok model kullanılarak panellerin etkinliği ve/veya kontrol şemaları incelenmektedir. Bu çalışmada ise [10] kaynağında parametreleri verilen Solar-X firmasına ait MSX-60 panelinden yararlanılmıştır. Bu panel maksimum 60W çıkış gücü, 3.5A kısa devre akımı, 21.1V açık devre gerilimi gibi özelliklere sahiptir.

PV model parametreleri ve solar panel denklemleri kullanılarak üç girişli bir çıkışlı bir fonksiyon bloğu oluşturularak benzetim ortamında modelleme yapılmıştır. Bloğun girişleri gerilim, ışınım ve sıcaklık olup çıkışı panel akımıdır. PV panel modellemesinde *ideal, bir diyotlu Rs, bir diyotlu Rp, iki diyotlu* model gibi farklı yapılar literatürde incelenmiştir [11-14]. Bu çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan *bir diyotlu Rs* modeli kullanılmıştır. Bu modele ait akım-gerilim ilişkisi (1) denkleminle tanımlanır [11-12].

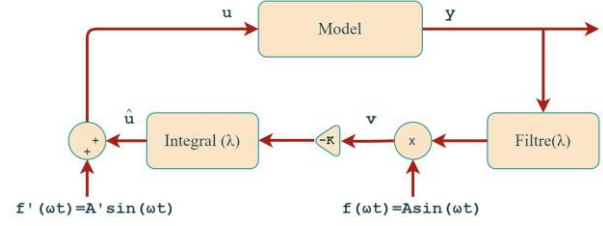
$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V+R_s I}{aKT/q}} - 1 \right] \quad (1)$$

Burada, K Boltzmann sabiti, q elektron yükü, a diyot idealite faktörü, T Kelvin olarak sıcaklık, I_{ph} fotovoltaik akım, I_s ise diyot ters doyum akımıdır.

2.2. Kesirli dereceden ekstremum arama kontrolcüsü (FO-ESC)

Uyarlamalı kontrolcüler arasında incelenen ekstremum arama kontrolcüsü (ESC) model parametrelerinin belirsiz veya değişken olduğu durumlarda tanımlanan amaç fonksiyonu üzerinden sisteme dair optimal giriş/çıkış ilişkisini tanımlamaktadır. ESC maksimum güç noktası izleme, rüzgar enerji sistemleri, ABS fren sistemleri gibi birçok alanda uygulanmaktadır [9, 15, 17]. ESC'nin parametre tanımlarının iyileştirilmesi, gelişmiş ESC yapıları gibi farklı çeşitleri literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak son yıllarda birçok uygulamada kendine yer bulan kesirli dereceden matematik tanımları da ESC şemasına eklenmektedir.

Kesirli dereceden matematik birçok teorik ve uygulamalı bilimlerde sağladığı esnek tasarım parametreleri sayesinde tercih edilmektedir. Türev ve integral terimlerinin tam sayılı karşılıkları yerine tam sayılı olmayan sayılardan seçilmesiyle birçok sistemin modellenmesi ve/veya kontrolü daha iyi yapılabilmektedir. Bu kapsamda kesirli dereceden ESC (FO-ESC) tam sayılı ESC yerine uygulamalarda tercih edilmeye başlanmıştır. Şekil 1 bir basitleştirilmiş bir FO-ESC yapısının genel blok diyagramını göstermektedir [4, 9, 15, 16].



Şekil 1. FO-ESC kontrol yapısı

Buna göre bir FO-ESC için matematiksel model denklemler (2)-(4)'deki gibi ifade edilebilir.

$$y = f(\hat{u} + f'(\omega t)) \quad (2)$$

$$D^\lambda \hat{u} = -Kv \quad (3)$$

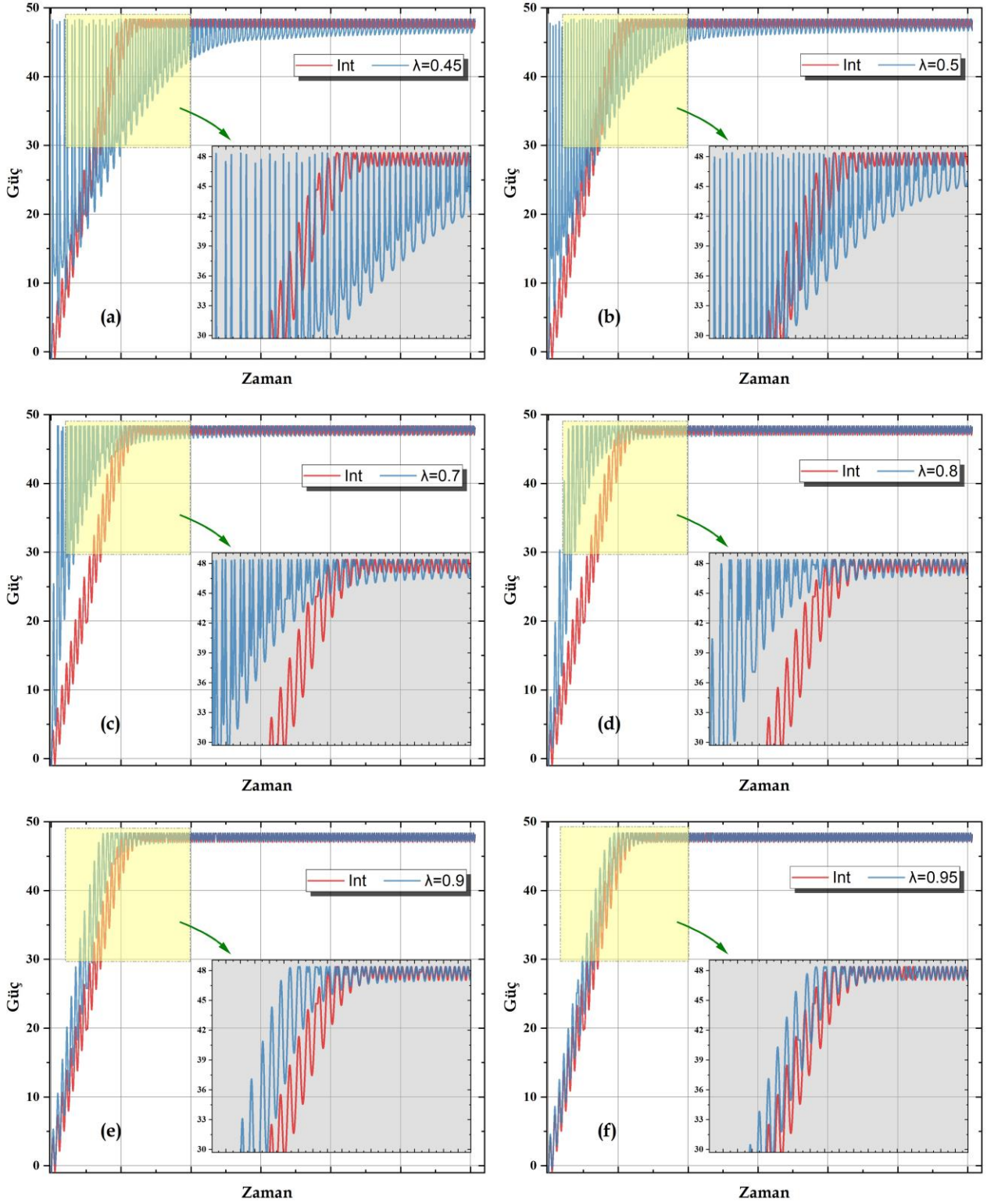
$$v = [y * \mathcal{L}^{-1}(\text{filtre})]f(\omega t) \quad (4)$$

3. Uygulama Bulguları ve Tartışma

3.1. Analiz 1: Sabit sıcaklık durumu

Kesirli dereceden kontrolcünün maksimum güç takibi durumunu irdelemek adına ilk olarak sabit sıcaklık koşulları altında denemeler yapılmıştır ($T=25^\circ\text{C}$). Şekil 2 buna dair sonuçları göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere farklı katsayılarla sahip kesirli dereceden kontrolcü (FO-ESC) tam sayılı, yani olağan ESC ile karşılaştırılmıştır. Şekilde tam sayılı ESC kırmızı ile gösterilirken FO-ESC değerleri mavimsiyle, grafiklerdeki büyütülmüş kısımlar ise sarı renkle gösterilmiştir. Kesirli kontrolcü için karşılaştırma değerleri olarak sırasıyla 0.45, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9 ve 0.95 katsayıları seçilmiştir.

Şekil 2 irdelemesi genel trend kontrolü, ilk durumdaki yükselme hızı, salınımlar ve nihai durum takibi gibi farklı açılardan ele alınabilir. Buna göre grafikten tam sayılı ESC ve bütün kesirli FO-ESC değerleri için genel trendin maksimum güç noktasını izlediği açıkça görülmektedir. Diğer değerlendirme kriterlerine ait incelemeler alt grafiklerden yapılabilir. Örneğin Şekil 2-a incelendiğinde FO-ESC'nin $\lambda=0.45$ değeri için ilk anda hızlı tepki vermesine rağmen salınımlarının yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum tam sayılı ESC değerinin daha az salınıma sahip olduğu bölgelerde de devam etmiştir (Şekil 2-a, büyütülmüş kısım). $\lambda=0.5$, FO-ESC (Şekil 2-b) için de benzer bir değerlendirme yapılabilir. Öte yandan tam sayılı ESC değerine yakın bir değer olan $\lambda=0.95$ FO-ESC (Şekil 2-f) için bir inceleme yapıldığında her iki grafiğin bütün değerlendirme kriterleri açısından birbirine oldukça yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bununla birlikte $\lambda=0.8$ ve $\lambda=0.9$ FO-ESC (Şekil 2-d, e) değerinin daha hızlı ilk tepki, salınımların az olması ve nihai maksimum noktasının izlenmesi açısından bir değerlendirmeye tabi tutulduğunda en optimal sonuçları ürettiği söylenebilir. Yüksek λ değerlerinde tam sayılı ESC'ye yakın değerlerin elde edilmesi, düşük λ değerlerinde optimal noktadan uzaklaşılması, ara λ değerlerinde ise optimal bir durumun elde edilmesi kesirli dereceden kontrolcülerin kullanıldığı durumlarda oluşması beklenen çıktılarla tutarlıdır.

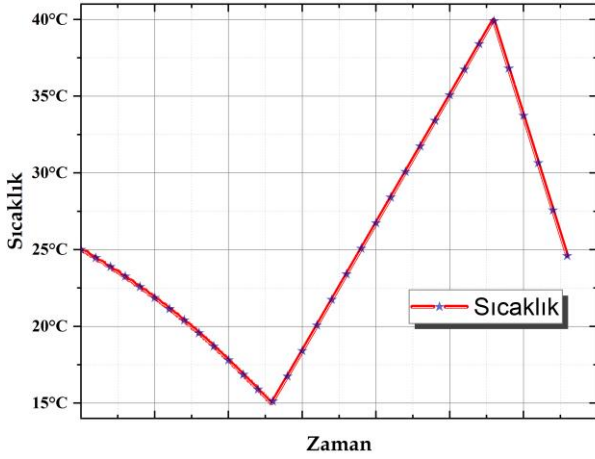


Şekil 2. Sabit Sıcaklık değerleri için tam ve farklı kesirli dereceden kontrolcü çıktıları ile grafiklerde büyütülmüş kısımlar (kırmızı; ESC, mavi; FO-ESC): a) $\lambda=0.45$, b) $\lambda=0.5$, c) $\lambda=0.7$, d) $\lambda=0.8$, e) $\lambda=0.9$, f) $\lambda=0.95$

3.2. Analiz 2: Değişken sıcaklık durumu

PV panelin ESC / FO-ESC kontrolcüsü ile maksimum güç noktası takibine dair irdelemeler farklı sıcaklık koşulları

düşünülmektedir. Bu çerçevede Şekil 3'de görülen herhangi bir değer için düzenli olmayan bir sıcaklık girdisi panel modeline uygulanmıştır.



Şekil 3. Değişken sıcaklık değerleri

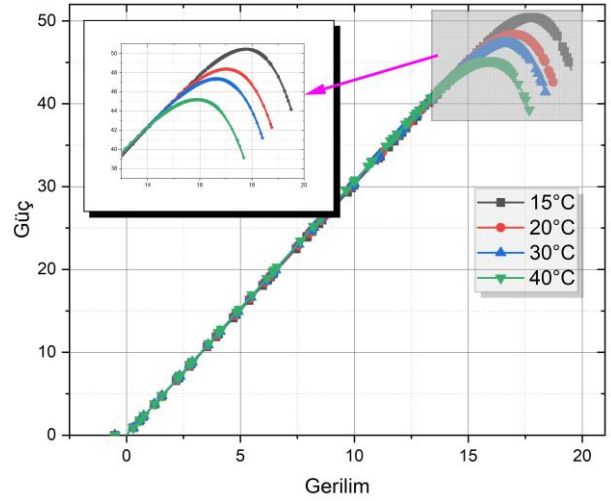
Şekil 3'de görülen sıcaklık eğrisi 15 ila 40 °C değerleri arasında yükselip alçalan değerlerden oluşan bir sıcaklık dizisini göstermektedir. Bu girdiye göre Bölüm 3.1 sabit sıcaklık değerlendirmesine benzer şekilde tam sayılı ESC ve FO-ESC'nin farklı katsayıları için kontrolcü çıktıları incelenmiştir. Şekil 6 buna dair sonuçları göstermektedir. Şekilde tam sayılı ESC kırmızı ile gösterilirken FO-ESC değerleri yeşille, grafiklerdeki büyütülmüş kısımlar ise mor renkle gösterilmiştir.

Genel trend kontrolü, ilk durumdaki yükselme hızı, salınımlar ve nihai durum takibi kriterleri düşünülerek Şekil 6 değerlendirilebilir. Sabit sıcaklık durumuna benzer şekilde farklı sıcaklık girdisi için de bütün kontrolcülerin genel trendi takip ettiği söylenebilir. Sıcaklığın azalma veya artma durumundan bağımsız bir şekilde kontrolcüler ilgili sıcaklık koşulu için modele uygun olarak maksimum güç noktasını takip edebilmişlerdir. Yalnızca $\lambda=0.45$ ve $\lambda=0.5$ katsayılı FO-ESC durumlarında sistem tepkisinin gecikmeli olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak $\lambda=0.95$ durumunda FO-ESC ve tam sayılı ESC değerleri birbirine oldukça yakın sonuçlar üretmiştir. Bu durum çıktıları, sabit sıcaklıkta yapılan inceleme ile paraleldir. Bölüm 3.1 sonuçlarıyla tutarlı olacak şekilde değişken sıcaklık girdilerine göre optimal sonuçların $\lambda=0.8$ ve $\lambda=0.9$ FO-ESC değerleri için elde edildiği görülmüştür.

3.3. Analiz 3: Maksimum güç noktası ve performans indeks incelemesi

Bölüm 3.1 ve 3.2 incelemelerine ek olarak farklı sıcaklıklarda maksimum güç noktasının nasıl değiştiğini göstermek adına gerilim/güç grafikleri irdelenmiştir. Şekil 4 buna dair sonuçları göstermektedir.

Grafikte görüleceği üzere bütün sıcaklıklar için PV panel, ürettiği gerilime bağlı bir güç değeri üretmektedir. Düşük gerilim değerlerinde beklediği şekilde düşük güç üretirken yüksek gerilim değerlerinde de akımın düşmesine bağlı olarak güç değeri azalmaktadır. Maksimum güç noktası sıcaklığa bağlı olarak birbirine yakın ancak farklı gerilim noktalarında oluşmaktadır. PV panellerin sıcaklığa bağlı olarak güçlerinin değişmesi gerçeği, elde edilen sonuçlarla tutarlıdır.



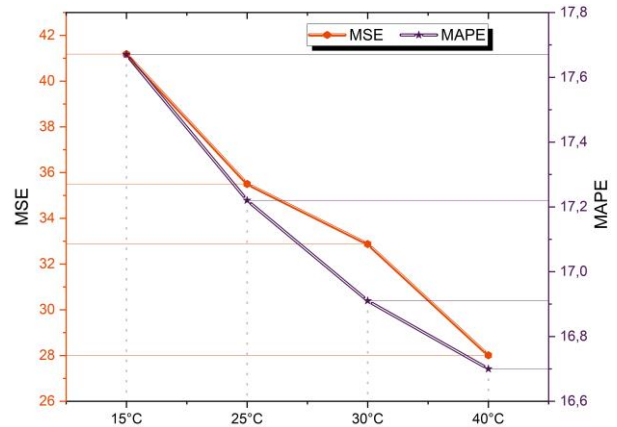
Şekil 4. Farklı sıcaklıklar için Gerilim/Güç değişimi

Kontrolcü çıktıları oluşturulan grafiklerde eğrilerin birbirine oldukça yakın olması, salınımların üst üste binmesi gibi problemlerden dolayı sonuçlar performans indeksleri açısından da değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Bu kapsamda sabit ve farklı sıcaklıklar için ortalama karesel hata (mean-squared-error; *MSE*) ve ortalama mutlak yüzde hata (Mean absolute percentage error; *MAPE*) indeks değerleri hesaplanmıştır (Denk. 5, 6)

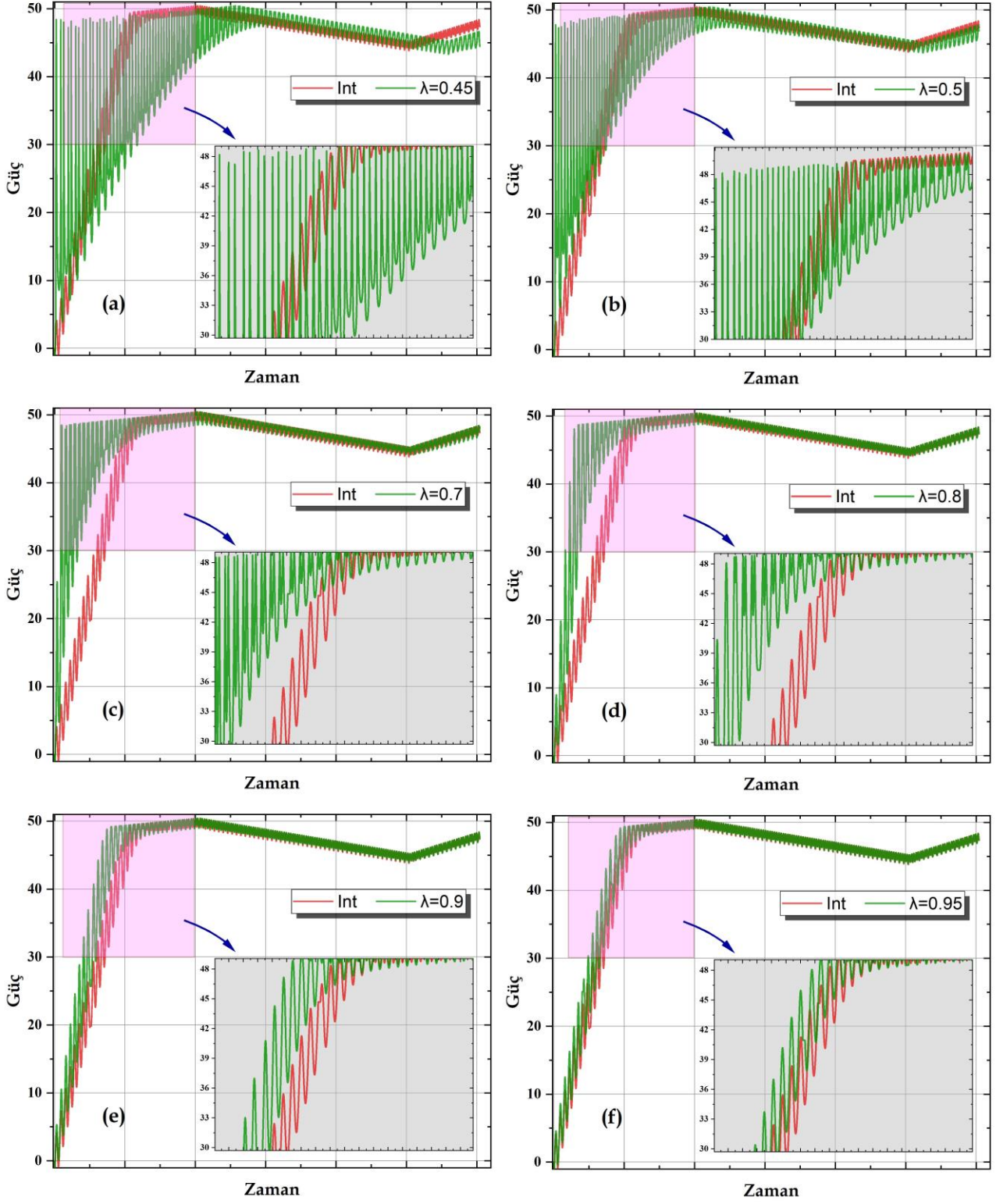
$$MSE(P_i^{ref}, P_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i^{ref} - P_i)^2 \quad (5)$$

$$MAPE(P_i^{ref}, P_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i^{ref} - P_i}{P_i^{ref}} \right| \times 100\% \quad (6)$$

Burada, *i* ilgili girdiler için o andaki hesaplanan güç değerinin indeksini, P_i^{ref} tam sayılı ESC, P_i ise FO-ESC sonuçlarını temsil etmektedir. Bölüm 3.1 ve 3.2 sonuçlarına göre FO-ESC için λ değeri 0.8 olarak seçilmiştir. İlgili hesaplamalara göre performans indeks değerlerini gösteren eğriler Şekil 5'deki gibidir.



Şekil 5. Performans indeks değerleri



Şekil 6. Değişken sıcaklık değerleri için tam ve farklı kesirli dereceden kontrolcü çıktıları ile grafiklerde büyütülmüş kısımlar (kırmızı; ESC, yeşil; FO-ESC): a) $\lambda=0.45$, b) $\lambda=0.5$, c) $\lambda=0.7$, d) $\lambda=0.8$, e) $\lambda=0.9$, f) $\lambda=0.95$

4. Sonuç

Bu çalışmada MSX-60 modeli olarak bilinen bir PV panel kullanılarak ESC ve FO-ESC kontrolcülerini ile sabit ve değişken sıcaklık şartlarında çıkış gücünün nasıl takip edildiğine dair bir değerlendirme yapılmıştır. Değerlendirme yapılırken tam sayılı ESC değerleri ile farklı integral katsayılarına sahip FO-ESC modelleri arasında kıyaslamalar göz önüne alınmıştır. Sabit sıcaklık koşulları için FO-ESC'nin klasik ESC'ye göre durumu incelendiğinde integral katsayısının çok düşük olduğu durumlarda çıkış gücünün nihai güç değeri için maksimum noktaya yakın sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Ancak bu durum için ilk koşullarda fazlaca osilasyonlar olduğuna şahit olunmuştur. Öte yandan integral katsayısının yüksek seçildiği durumlarda ise klasik ESC modeline benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Bununla birlikte ara integral katsayı değerlerinde klasik ESC'den daha iyi maksimum güç nokta takibi yapılabildiği gözlemlenmiştir. Bu durum kesirli türev/integral terimlerinin kullanıldığı uygulamalarda karşılaşılan esnek parametre tanımına göre daha iyi sonuçların elde edilmesi beklentilerini karşılamaktadır. Benzer bir kıyaslama, çalışma kapsamında üretilen bir sıcaklık değişim modeli üzerinden de yapılmıştır. Bu durum çıktıları da ilk analize benzer olmuş ve FO-ESC'nin ara integral değerleri için klasik ESC'ye göre daha iyi sonuçlar verdiği sonucunu ortaya koymuştur.

Kaynakça

- [1] E. S. Du et al., "The Role of Concentrating Solar Power Toward High Renewable Energy Penetrated Power Systems," (in English), *Ieee T Power Syst*, vol. 33, no. 6, pp. 6630-6641, Nov 2018, doi: 10.1109/Tpwr.2018.2834461.
- [2] C. Bauner and C. L. Crago, "Adoption of residential solar power under uncertainty: Implications for renewable energy incentives," (in English), *Energ Policy*, vol. 86, pp. 27-35, Nov 2015, doi: 10.1016/j.enpol.2015.06.009.
- [3] B. Subudhi and R. Pradhan, "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems," (in English), *Ieee T Sustain Energ*, vol. 4, no. 1, pp. 89-98, Jan 2013, doi: 10.1109/Tste.2012.2202294.
- [4] A. O. Baba, G. Y. Liu, and X. H. Chen, "Classification and Evaluation Review of Maximum Power Point Tracking Methods," (in English), *Sustain Futures*, vol. 2, 2020, doi: ARTN 100020 10.1016/j.sft.2020.100020.
- [5] F. Rasool, M. Driberg, N. Badruddin, and B. S. M. Singh, "PV panel modeling with improved parameter extraction technique," (in English), *Sol Energy*, vol. 153, pp. 519-530, Sep 1 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.05.078.
- [6] S. A. Rahman, R. K. Varma, and T. Vanderheide, "Generalised model of a photovoltaic panel," (in English), *Iet Renew Power Gen*, vol. 8, no. 3, pp. 217-229, Apr 2014, doi: 10.1049/iet-rpg.2013.0094.
- [7] Y. P. Zhang, S. N. Gao, and T. K. Gu, "Prediction of I-V characteristics for a PV panel by combining single diode model and explicit analytical model," (in English), *Sol Energy*, vol. 144, pp. 349-355, Mar 1 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.01.043.
- [8] A. F. T. Njomo, G. Kenne, R. M. Douanla, and L. L. Sonfack, "A Modified ESC Algorithm for MPPT Applied to a Photovoltaic System under Varying Environmental Conditions," (in English), *Int J Photoenergy*, vol. 2020, Aug 13 2020, doi: ARTN 1956410 10.1155/2020/1956410.
- [9] A. Necaibia, S. Ladaci, A. Charef, and J. J. Loiseau, "Fractional order extremum seeking approach for maximum power point tracking of photovoltaic panels," (in English), *Front Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 43-53, Mar 2015, doi: 10.1007/s11708-014-0343-5.
- [10] A. Belkaid, I. Colak, and K. Kayisli, "Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions," (in English), *Electr Eng*, vol. 99, no. 3, pp. 839-846, Sep 2017, doi: 10.1007/s00202-016-0457-3.
- [11] A. R. Jordehi, "Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review," (in English), *Renew Sust Energ Rev*, vol. 61, pp. 354-371, Aug 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.049.
- [12] A. Hussein, "A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules," (in English), *Turk J Electr Eng Co*, vol. 25, no. 5, pp. 4431-4444, 2017, doi: 10.3906/elk-1703-14.
- [13] M. I. Mosaad, M. O. A. el-Raouf, M. A. Al-Ahmar, and F. A. Banakher, "Maximum Power Point Tracking of PV system Based Cuckoo Search Algorithm; review and comparison," (in English), *Energ Proced*, vol. 162, pp. 117-126, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.013.
- [14] M. H. Qais, H. M. Hasanien, S. Alghuwainem, and A. S. Nouh, "Coyote optimization algorithm for parameters extraction of three-diode photovoltaic models of photovoltaic modules," (in English), *Energy*, vol. 187, Nov 15 2019, doi: ARTN 116001 10.1016/j.energy.2019.116001.
- [15] H. Malek, S. Dadras, and Y. Q. Chen, "An Improved Maximum Power Point Tracking Based on Fractional Order Extremum Seeking Control in Grid-Connected Photovoltaic (Pv) Systems," (in English), *Proceedings of the Asme International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2013, Vol 4, 2014. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000362380700071.
- [16] Malek, S. Dadras, and Y. Q. Chen, "A Fractional Order Maximum Power Point Tracker: Stability Analysis and Experiments," (in English), 2012 *Ieee 51st Annual Conference on Decision and Control (Cdc)*, pp. 6861-6866, 2012. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000327200407021.
- [17] L. Dewasme and A. Vande Wouwer, "Model-Free Extremum Seeking Control of Bioprocesses: A Review with a Worked Example," (in English), *Processes*, vol. 8, no. 10, Oct 2020, doi: ARTN 1209 10.3390/pr8101209.